

# ДИФФУЗНОЕ РАССЕЙЯНИЕ СИСТЕМОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРЕУГОЛЬНИКОВ

Лебедев А.М. \*<sup>1</sup>, Фурманова Т.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 09.02.2023

Одобрена после рецензирования 26.02.2023

Принята к публикации 14.03.2023

## Аннотация

Решались задачи, во-первых, обеспечения существенно диффузного рассеяния системой металлических треугольников, расположенных над поверхностью металлического объекта, и, во-вторых, изучения энергетических характеристик диффузного рассеяния системой треугольников в полосе частот. Предлагается треугольники располагать наклонно и по возможности хаотично по отношению как к поверхности объекта, так и к соседним треугольникам. Обращение треугольников заострёнными носами в сторону облучения обеспечивает согласованный вход падающей волны в область пространства, занятую треугольниками. Падающие лучи после отражения от наклонных треугольников отбрасываются вглубь области, занятой треугольниками, и начинают "блуждать" в этой области. Результатом этого является хаотизация распространения падающей волны. Исследована частотная зависимость двухпозиционного рассеяния системой треугольников, обеспечивающей неполную, но весьма высокую степень хаотизации волны. Последнее соответствует возможным реальным конструкциям, которые не могут обеспечивать полную хаотизацию по следующим двум причинам. Во-первых, число путей движения частей мощности падающей волны в объёме хаотизирующей структуры всегда конечно, хотя, возможно, и весьма велико. Во-вторых, на практике неизбежно составление хаотизирующей структуры из фрагментов определённой формы. Выявленный факт стабилизации как среднего уровня диаграмм рассеяния, так и уровня максимумов осцилляций этих диаграмм при вариации частоты в очень широкой полосе указывает на возможность применения подобных хаотизирующих конструкций на практике.

**Ключевые слова:** система металлических треугольников; согласованный вход; хаотизация распространения волны; высокая, но неполная степень хаотизации; постоянство среднего уровня диаграмм рассеяния в широкой полосе частот

EDN HSYQFQ

## Введение

Диффузное рассеяние является следствием способности рассеивателя, во-первых, в близком к согласованному режиме впускать падающую волну в объём, занимаемый рассеивателем, и, во-вторых, существенно хаотизировать распространение падающей электромагнитной волны в объёме рассеивателя. Далее интенсивность обратного и двухпозиционного рассеяния будем характеризовать эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР), в соответствии с [1], [2], и диаграммами рассеяния (ДР), представляющими зависимости ЭПР от угла наблюдения. Всё более выраженная хаотизация падающей волны некоторой структурой означает возрастание количества путей движения частей мощности падающей волны внутри структуры. Итоговая ДР формируется как результат суммирования множества малых вкладов, каждый из которых получается в результате движения фрагмента падающей волны по своему пути в объёме рассеивателя. Всё более выраженная хаотизация с возрастающей вероятностью должна обеспечивать выравнивание угловых зависимостей ЭПР (уменьшение осцилляций ДР). Одновременно рассеяние на обеих поляризациях, совпадающей и крессовой, приближается к равновероятному в любом направлении. Из приведённого в [2] анализа следует, что в предположении равновероятного рассеяния во всех направлениях от идеального бездиссипативного (не имеющего в своём составе поглощающих материалов) хаотизатора его моностатическая и бистатическая ЭПР на совпадающей и крессовой поляризациях равна  $S \cdot \cos \beta$ . Здесь  $S$  – площадь облучаемой поверхности рассеивателя, например,

\* Автор, ответственный за переписку: Андрей Михайлович Лебедев, itae@itae.ru

площадь входа в полость, внутри которой далее направление распространения волны полностью хаотизируется,  $\beta$  - угол между направлением облучения и нормалью к облучаемой поверхности. При этом ЭПР идеального хаотизатора не зависит от частоты, как и у идеально проводящей сферы [1], [2].

В связи с изложенным, представляет как научный, так и практический интерес вопрос об уровнях ЭПР, наблюдаемых в широкой полосе частот, в случае рассеяния структурами, которые не полностью, но в высокой степени хаотизируют падающую волну. На основе таких структур можно создавать широкополосные поглощающие конструкции.

### Постановка задачи численного определения двухпозиционной диаграммы рассеяния системой диффузно рассеивающих металлических треугольников

Пусть облучение происходит по нормали к поверхности металлического объекта. Существенно диффузное рассеяние от поверхности предлагается обеспечить введением системы металлических треугольников над поверхностью. Треугольники должны быть вытянуты в направлении облучения и расположены наклонно, по возможности хаотично по отношению как к поверхности объекта, так и к соседним треугольникам. Желательно, чтобы треугольники в значительной мере перекрывали поверхность объекта с направления облучения. Общий вид системы треугольников, использованной в расчётах, представлен в левой части рисунка 1. Справа на рисунке 1 приведены два фрагмента, представляющие собой группы треугольников над квадратом поверхности. Из этих фрагментов и была составлена вся система треугольников путём смещения и поворота фрагментов.

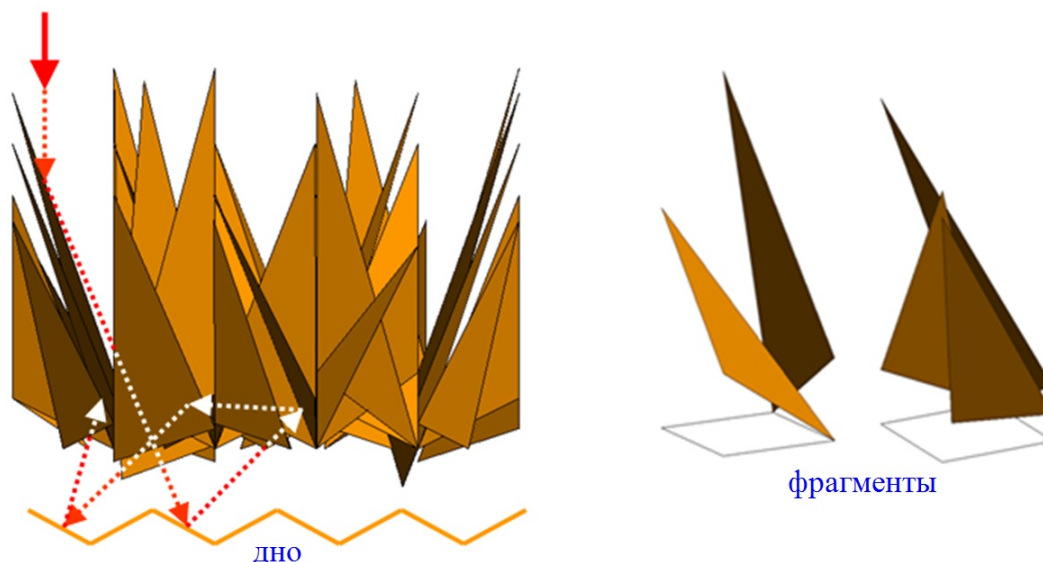


Рисунок 1 – Слева - заход падающей волны в систему треугольников и пример переотражений части падающей волны внутри этой системы. Справа – отдельные фрагменты, или группы треугольников, из которых была составлена вся система треугольников

Вытянутость треугольников в направлении облучения и практически полное перекрытие ими поверхности обеспечивают отбрасывание падающих лучей после первого отражения от вытянутых треугольников вглубь области с треугольниками. Вследствие умеренно большого дополнительного наклона участков дна (участков поверхности металлического объекта) после второго отражения лучи “запускаются” в направлениях, близких к направлениям вдоль поверхности объекта, и начинают “блуждать” в области, занятой треугольниками, смотри пример траектории луча на рисунке 1. Хаотизация падающей волны достигается в результате переотражений фрагментов волны, дробящихся на части после каждого переотражения.

Общий размер системы треугольников, использованной при численных экспериментах, был взят 300 x 300 мм. При этом в направлении вытянутости размер треугольников составил 120 - 180 мм, в поперечном направлении 40 - 50 мм. Боковой обмен энергией, который происходил бы по краям макета, если бы он был частью намного более значительного множества треугольников, имитировался введением вертикальных металлических стенок по краям макета, как это показано на рисунке 2.

Диапазон частот, в котором проводился расчёт, составил (1-30) ГГц. Таким образом, поперечный размер макета составлял от 1 до 30 длин волн. При этом продольный размер треугольников варьировался от приблизительно половины длины волны до более чем 10 длин волн, а поперечный размер - от

приблизительно  $1/6$  длины волны до 4 - 5 длин волн.

Двухпозиционные ДР рассчитывались в четырёх плоскостях, полученных последовательным поворотом (увеличением угла азимута  $\varphi$ ) на  $45^\circ$ ; при этом угол зенита  $\theta$ , являющийся аргументом ДР, отсчитывался от направления нормали к поверхности, как это показано на рисунке 2.

Расчёты проводились с помощью программы электродинамического моделирования FEKO [3].

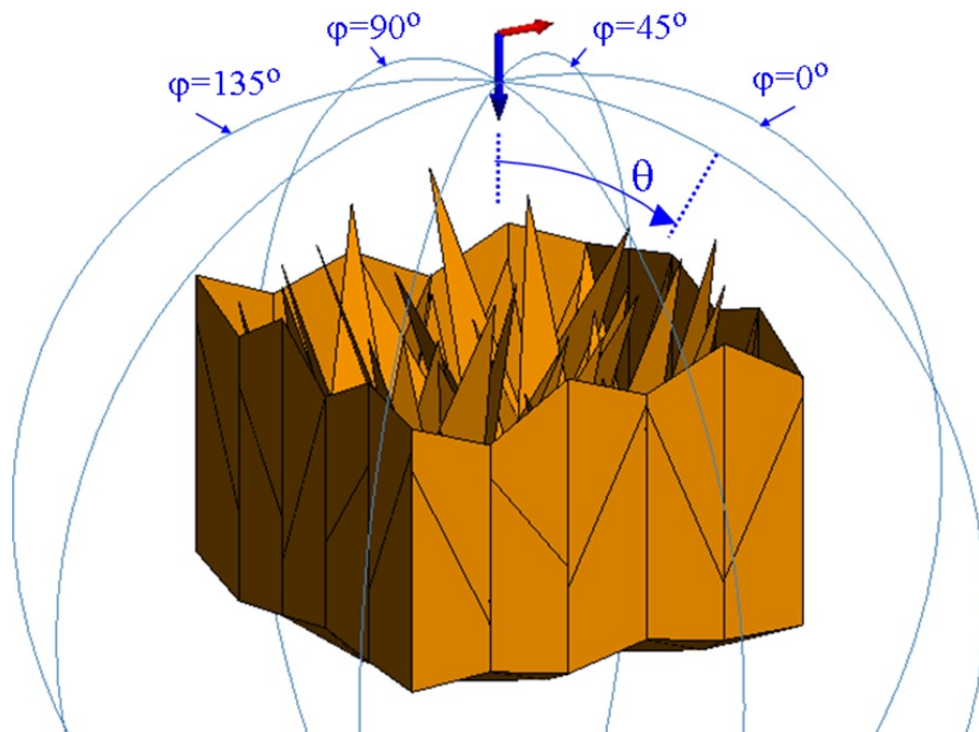


Рисунок 2 – Используемый в расчётах макет с системой треугольников. Показаны также четыре плоскости постоянного угла азимута  $\varphi$ , в которых рассчитывались двухпозиционные диаграммы рассеяния

## Результаты исследования двухпозиционного рассеяния системой металлических треугольников, хаотизирующих распространение падающей волны

На рисунке 3 приведены двухпозиционные ДР системы металлических треугольников на существенно отличающихся частотах 1, 6 и 30 ГГц в четырёх плоскостях постоянного азимута, полученные в результате численного решения соответствующих дифракционных задач.

Результаты расчётов говорят о достижении высокой степени хаотизации падающей волны, описанной системой металлических треугольников. Действительно, на всех частотах и во всех плоскостях расчёта наблюдалось единообразное изменение среднего уровня ДР в переднем полупространстве перед системой треугольников  $\theta = [-90^\circ, 90^\circ]$ . Более того, в этой угловой области можно говорить и о стабилизации уровня максимальных значений ЭПР в пиках осцилляций ДР.

Высокая степень хаотизации падающей волны подтверждается также количественным соответствием полученной в расчёте интенсивности обратного (моностатического) и двухпозиционного (бистатического) рассеяния системой треугольников с одной стороны, и идеальным хаотизатором [2] с другой стороны. Для принятого направления облучения моностатическая и бистатическая ЭПР идеального хаотизатора равны  $S$ . Согласно рисунку 3, на всех частотах расчёта моностатическая ЭПР металлической поверхности под системой треугольников уменьшилась до уровней  $[S, 10 \cdot S]$ , где  $S \approx 0.1 \text{ м}^2$  – площадь входа в систему треугольников. Бистатическая ЭПР системы треугольников на всех частотах и во всех плоскостях расчёта менялась в интервале  $[0.1 \cdot S, 10 \cdot S]$ . При этом двухпозиционная ДР системы треугольников в переднем полупространстве всегда имеет один и тот же колоколообразный вид (рисунок 3). Таким образом, в расчёте не наблюдалось выхода на однородную по углу наблюдения двухпозиционную ДР, предсказанную в [2] для идеального хаотизатора в предположении равномерного рассеяния по всем направлениям. В связи с этим отметим, что вопросы о том, обязательно ли двухпозиционная ДР идеального хаотизатора должна быть однородной по углу, и если нет, то какой вид приобретает ДР идеального хаотизатора в зависимости от его конструкции, требуют дальнейшего изучения.

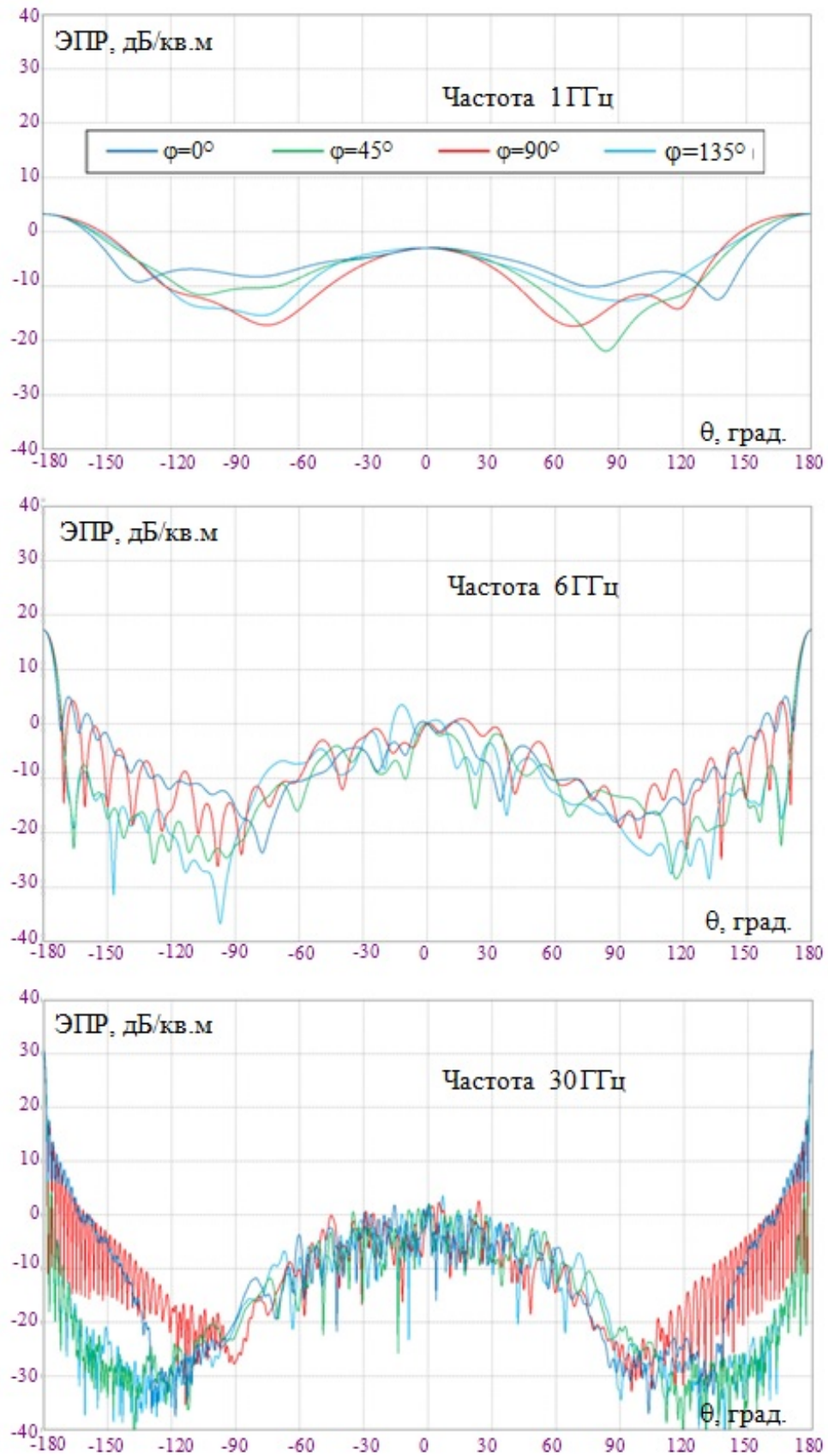


Рисунок 3 – Результаты расчётов двухпозиционных диаграмм рассеяния системой металлических треугольников на частотах 1, 6 и 30 ГГц в четырёх плоскостях постоянного угла азимута  $\varphi$

Высокая степень хаотизации падающей волны системой треугольников подтверждается также и тем, что, как показали дополнительные исследования, на частотах расчёта двухпозиционные ЭПР системы на совпадающей и крессовой поляризациях соизмеримы друг с другом в переднем полупространстве, хотя и далеки от буквального совпадения.

Наличие осцилляций ДР около среднего уровня свидетельствует о неполной степени хаотизации системой треугольников. Разумеется, стабилизации хода осцилляций ДР с ростом частоты быть не может. Действительно, с вариацией частоты меняется разность фаз между вкладами в рассеяние от фрагментов падающей волны, двигающимся по разным путям в объёме хаотизирующей структуры. Кроме того, фазы по разным траекториям меняются всё быстрее с увеличением частоты, так что угловая ширина осцилляций уменьшается.

Для реальных хаотизирующих структур всегда будет иметь место неполнота степени хаотизации падающей волны. Действительно, степень хаотизации всегда может быть увеличена, в рассматриваемом случае – например, добавлением более мелких треугольников в области дна структуры. Рассмотренная система треугольников не может обеспечить полной хаотизации ещё и потому, что состоит из фрагментов с двумя типами геометрии (рисунок 2).

На практике любая реальная протяжённая конструкция, хаотизирующая падающую волну, с неизбежностью будет состояться из повторяющихся фрагментов. Хотя в данной работе исследовано рассеяние моделью хаотизатора частного вида, но полученные результаты позволяют сделать следующий вывод общего характера: структура, составленная из конечного набора фрагментов с фиксированной геометрией, может обеспечить высокую степень хаотизации падающей волны.

Представляет методический интерес следующий из результатов расчётов факт сохранения пропорциональности моностатической и бистатической ЭПР площади участка, закрываемого хаотизирующей системой треугольников, при уменьшении размеров участка вплоть до равного длине волны. В отличие от этого, при радиолокационной маскировке участка поверхности металлического объекта нанесением поглотителя постоянной толщины, либо пирамидального, и уменьшении размеров маскируемого участка до порядка длины волны имеет место так называемый размерный эффект [4]. Он заключается в очень существенном снижении эффективности маскировки по сравнению с маскировкой участка с размерами много больше длины волны.

## Заключение

В ходе численных экспериментов доказано, что построенная по определённым правилам система металлических треугольников, располагаемая над закрываемой поверхностью, может не полностью, но в достаточно сильной степени хаотизировать распространение падающей волны, что обеспечит относительно малую ЭПР закрываемой поверхности, которая не растёт с возрастанием частоты в очень широкой полосе частот.

Системы металлических треугольников и, возможно, некоторые другие комбинации элементов, обеспечивающие неполную, но достаточно сильную хаотизацию падающей волны, могут служить основой для разработки широкополосных поглощающих конструкций.

## Список литературы

- [1] Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. - М.: Советское радио, 1975. - 248 с.
- [2] Radar Cross Section / E.F. Knott, J.F. Shaeffer, M.T. Tuley. - 2nd ed., SciTech Publishing, Inc., USA. 2004. – 637 p.
- [3] Feko, <https://www.altair.com>
- [4] Лебедев А.М., Семененко В.Н., Фурманова Т.А., Краснолобов И.И. Размерный эффект в метровом диапазоне длин волн при маскировке поверхности пирамидальным поглотителем // Современная электродинамика. - 2022. - Т. 1, №2. - С. 32-37.

## DIFFUSIVE SCATTERING FROM THE SYSTEM OF METAL TRIANGLES

Lebedev A.M.<sup>1\*</sup>, Furmanova T.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics of RAS, Moscow, Russia

\* itae@itae.ru

### Abstract

Two tasks were solved: firstly, to provide substantially diffusive scattering by a system of metal triangles located above the surface of a metal object, and, secondly, to study the energy characteristics of diffusive scattering from a system of triangles in the frequency band. It is proposed to arrange the triangles obliquely and, if possible, chaotically with respect both to the surface of the object and to neighboring triangles. Orientation of the triangles' sharpened noses in direction of irradiation provides a matched entrance of the incident wave into the region of space occupied by triangles. Being reflected from the inclined triangles, incident rays are thrown deep into the region with triangles and begin to "excuse" in this region. This results in chaotization of the incident wave propagation. Frequency dependence of two-position scattering from the system of triangles, which provides high but not complete degree of chaotization, has been investigated. Any possible real randomizing construction can provide only not complete chaotization for the following two reasons. First, number of paths, along which the incident wave parts travel within the volume of randomizing structure, is always finite though it can be quite big. Second, in practice any randomizing structure is inevitably composed of a finite set of the certain shape fragments. The revealed fact of fixing both average and oscillations' maximum levels of scattering patterns in a very wide frequency band indicates the possibility of practical application of such randomizing constructions.

**Key words:** system of metal triangles, matched entrance, chaotization of wave propagation, high but not complete degree of chaotization, fixing the radar cross section levels in the frequency band

---